Die Dauerstandfestigkeit geschweißter Kesselbleche

Von der Technischen Hochschule zu Breslau zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl. Ing. Dr. Clemens Appaly

aus Breslau

Referent:

Prof. Dr. F. Sauerwald

Korreferent:

Prof. E. Diepschlag

Tag der mündlichen Prüfung: 11. 2. 1935

Breslau
Druck von Wilh. Gottl. Korn
1935

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Die Anregung zu Versuchen über Festigkeitseigenschaften von geschweißten Kesselblechen erhielt ich aus meiner beruflichen Tätigkeit als Ingenieur des Schlesischen Vereins zur Überwachung von Dampfkesseln Breslau.

Die Durchführung dieser Versuche als Dauerstandversuche erfolgte im neugeschaffenen Dauerstandfestigkeits-Laboratorium am Lehrstuhl für Metallkunde (Prof. Dr. Sauerwald) der Technischen Hochschule Breslau. Es war mir vergönnt, an der Neuschaffung dieses Laboratoriums durch Konstruktion der dort aufgestellten Dauerbelastungsmaschine mitzuwirken.

Herrn Professor Dr. Sauerwald möchte ich an dieser Stelle für die vielfachen Anregungen und die weitgehende Förderung der Untersuchungen meinen ganz besonderen Dank aussprechen.

Ferner danke ich Herrn Direktor Wolff von der Zuckerfabrik Puschkowa und Herrn Konsul Freudenberg der Firma Främbs & Freudenberg, Schweidnitz, für die Unterstützung beim Bau der Dauerbelastungsmaschine durch Material und Arbeitskräfte, weiter Herrn Direktor Zunckel vom Schlesischen Verein zur Überwachung von Dampfkesseln für die wohlwollende Förderung der Arbeit.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549814_0090

Einleitung

Mit der zunehmenden Verwendung der Kessel- und Behälterbaustoffe bei höheren Temperaturen infolge höherer Drucke und stärkerer Überhitzungen hielt auch die sorgfältige Erforschung über das Verhalten dieser Werkstoffe in der Wärme Schritt. In bezug auf die wohl am meisten verwendeten Kesselwerkstoffe Flußstahl I bis III liegen die Zusammenstellungen über die bei verschiedenen Temperaturen erlangten Zugversuchswerte von Fischer[1]) und die umfangreichen Untersuchungen von Körber und Pomp[1a)] vor. Schon frühzeitig war die Erscheinung der Verringerung der Widerstandsfähigkeit der untersuchten Kesselwerkstoffe bei langer Versuchsdauer festgestellt worden, wobei diese Erscheinung bei Temperaturen über 300° C. von besonderer Wichtigkeit wird. In den Arbeiten von Bach[1b)] finden sich die entsprechenden Hinweise. F. Körber und A. Pomp[2] bringen zum Ausdruck, daß die Festigkeit bei langer Versuchsdauer, die als Dauerstandfestigkeit bezeichnet wird, bei Kesselblechen bei 300° angenähert mit der Streckgrenze zusammenfällt, bei 400° in der Nähe der 0,01- und 0,03-Grenze und bei 500° unterhalb der 0,01-Grenze liegt. Damit dürfte nach dem Vorhergesagten für Kesselbaustoffe, die bei Temperaturen über 300° Verwendung finden sollen, die Kenntnis der Streckgrenze als Berechnungsunterlage nicht mehr genügen, und für den Konstrukteur gewinnt die Kenntnis der Dauerstandfestigkeit der Kesselwerkstoffe bei Temperaturen über 300° C. besondere Bedeutung.

Nachdem die Schmelzschweißnaht als Verbindungselement im Kessel- und Behälterbau in hohem Maße Eingang gefunden hat, ist es natürlich, daß der Kenntnis der Festigkeitseigenschaften der Schweißverbindung die gleiche Bedeutung zukommt wie der Kenntnis der Festigkeitseigenschaften der Kesselwerkstoffe. Die Tatsache, daß dieSchmelzschweißung ganz besonders auch dort angewendet wird, wo hohe Temperaturen in solchen Gefäßen auftreten, gab Veranlassung, die Versuche der vorliegenden Arbeit über Festigkeitseigenschaften der Schweißverbindungen als Versuche von langer Dauer (Dauerstandfestigkeitsversuche) durchzuführen, was nach dem oben Gesagten über die Widerstandsfähigkeit der Kesselwerkstoffe bei Temperaturen über 300° C. und langer Versuchsdauer ohne weiteres verständlich ist.

Die Dauerstandfestigkeit wird festgestellt, indem man einen Stab bei konstanter Temperatur mit einer bestimmten Last belastet und seine Dehnung mit der Zeit mit Feinmeßgeräten feststellt. Klingt die Dehnung mit der Zeit rasch ab und sinkt die Dehngeschwindigkeit nach einer Beobachtung von Wochen und Monaten unter einen praktisch erträglichen Wert, bezeichnet man das Material als dauerstandfest. Als praktisch zulässige Grenze der Dehngeschwindigkeit bei einem solchen Langzeitversuch sieht man $1 \cdot 10^{-4}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$% Dehnung, im Mittel $1 \cdot 10^{-5}$%, pro Stunde an. Natürlich ist diese Grenze eine rein konventionelle, ihre Zweckmäßigkeit hängt allein von ihrer praktischen Bewährung ab. Dabei tritt eine gewisse Schwierigkeit auf, wenn man Rücksicht auf das Maß der erfolgten Dehnung nimmt. Unter Umständen kann natürlich auch, wenn die Dehngeschwindigkeit klein geworden ist, eine bis dahin erfolgte Gesamtdehnung von größerem Ausmaß eine Konstruktion gefährden.

Es wird daher in der vorliegenden Arbeit Wert darauf gelegt, die Dauerstandfestigkeit nicht nur aus der absoluten Größe der Dehngeschwindigkeit und dem daraus abgeleiteten Abkürzungsverfahren nach Pomp und Enders, sondern nach einem Verfahren zu bestimmen, welches auf Beobachtung der Zunahme der Dehngeschwindigkeiten bei Zunahme der Belastungen beruht. Dieses wird als Knickpunktverfahren bezeichnet und ist zuerst von H. Juretzek[3]) angeregt worden.

Versuchseinrichtung

a) Prüfmaschine

Die Versuche kamen zur Durchführung an einer Dauerbelastungsmaschine[4]), die in Abb. 1 dargestellt ist. Das schmiedeeiserne, reichlich dimensionierte Gerüst wurde aus Normal U- und Winkeleisen mittels Nietung zusammengefügt. Zur Erreichung hoher Stabilität waren sämtliche Nietstellen mit Knotenblechen versehen worden.

Auf dem Gerüst ruht der Waagebalken, dessen Übersetzungsverhältnis 1 : 30 beträgt. Das eine Ende des Waagebalkens trägt ein verschiebbares Ausgleichgewicht, am anderen Ende ist die Gewichtsstange mit Teller zur Aufnahme der Belastungsgewichte angebracht. 50 mm von der Lagerstelle des Waagebalkens entfernt, greift der obere Einspannkopf am Waagebalken an.

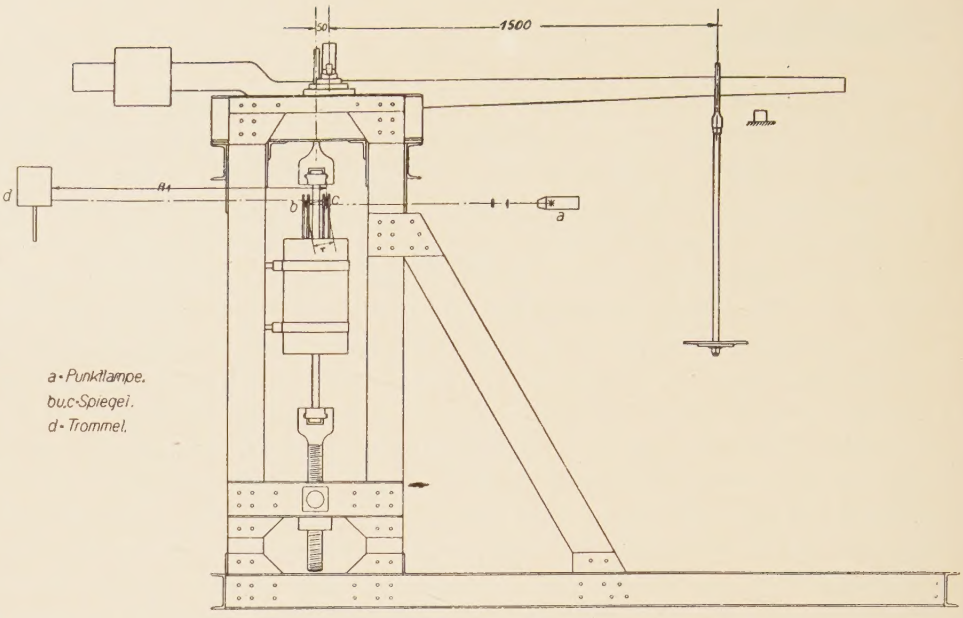


Abb. 1. Schematische Darstellung der Dauerbelastungsmaschine (Konstruktion C. Appaly) und der selbsttätigen optischen Registriereinrichtung.

Gewichtsstange, oberer Einspannkopf und Waagebalken sind in Schneiden gelagert. Die Schneidenlager der beiden erstgenannten Teile können sich allseitig bewegen. Im Gerüst ruht der untere Einspannkopf. Er läuft in eine Schraubenspindel aus, die sich in senkrechter Richtung verstellen läßt. Dadurch wird es ermöglicht, den Waagebalken in die horizontale Lage einzuspielen. In beiden Einspannköpfen ist Kugelschalenlagerung angeordnet. Die vorher erwähnte allseitige Bewegungsmöglichkeit des oberen Einspannkopfes im Verein mit der Kugelschalenlagerung gibt die Gewähr, daß die Last am Probestab vollkommen zentrisch angreift.

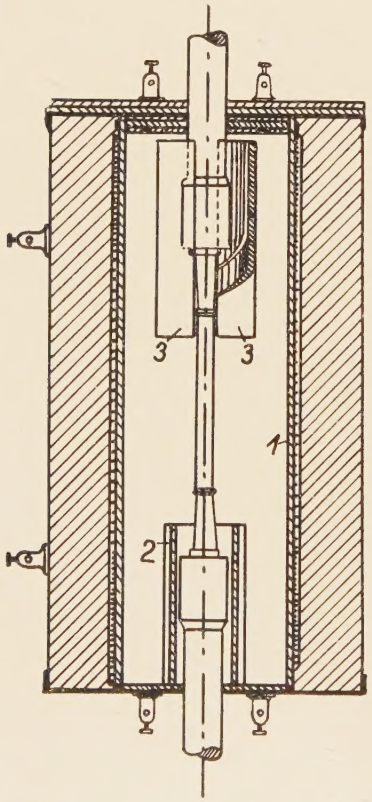


Abb. 2.
Elektrisch beheizter Luftbadofen mit oberem und unterem Zusatzofen.

Der Probestab wird an seinen Enden mittels Gewinde in die Verlängerungsstücke eingeschraubt, welche in den Kugelschalen der Einspannköpfe gelagert sind. Die Belastung des Probestabes erfolgt in der Weise, daß Gewichte zur Wirkung kommen, die auf den vorher erwähnten, an der Gewichtsstange befestigten Teller aufgelegt werden. Während des Aufbringens der Belastungsgewichte liegt der Waagebalken auf einer Fangvorrichtung auf, die zwischen Gewichtsstange und dem Ende des Waagebalkens angeordnet ist. Es wird dadurch erreicht, daß Erschütterungen des Probestabes durch das Auflegen der einzelnen Gewichte nicht eintreten können. Die vorgesehene Last kommt in ihrer Gesamtheit dadurch zur Wirkung, daß eine Gewindespindel, die an der Fangvorrichtung angebracht ist, gleichmäßig gesenkt wird. Die Eichung der Dauerbelastungsmaschine mit einem Kraftprüfer für 3000 kg des Losenhausenwerkes zu Düsseldorf ergab, daß der ermittelte Fehler unter 1 % lag.

b) Meßgerät und Beheizung.

Die Messung der Dehnung am Probestab erfolgte mittels Martensschen Spiegelapparates, wobei die Anordnung der

Tafel 1

Zerreißfestigkeiten von geschweißten Stäben (Schweißraupe abgearbeitet) und Vollblechvergleichsstäben

Werkstoff	0.2 Genze kg/mm²	Zugfestigkeit kg/mm²	Bruchdehnung bei 30 mm Messl. %	Einschnürung %	Bemerkungen
Stab geschweißt	33.4	41.2	26.7	58.2	Bruch im Blech, dicht an der Meßmarke
„ „	32.5	39.5	30.7	59.0	
„ „	35.8	43.2	25.7	59.2	
Stab aus Flußstahl I	26.2	34.5	60.6	70.0	
„ „ „ „	25.6	36.3	56.7	65.2	
„ „ „ „	26.2	35.8	56.4	66.5	

Meßfedern und der Spiegel in der gleichen Weise durchgeführt wurde, wie sie in einer Arbeit des Kaiser-Wilhelm-Institutes für Eisenforschung[5]) dargestellt und beschrieben ist.

An Stelle der vielfach benutzten Fernrohrablesung kam auch hier eine optische Registriereinrichtung zur Verwendung, welche fortlaufend die Dehnung des Probestabes während der ganzen Versuchsdauer oder in gewünschten Zeitabschnitten auf lichtempfindliches Bromsilberpapier aufzeichnet. Anordnung, Wirkungsweise und Vorteile einer solchen optischen Registriereinrichtung sind in der vorerwähnten Arbeit des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Eisenforschung eingehend besprochen worden, weshalb an dieser Stelle darauf verzichtet werden kann. Nur zum Verständnis des auftretenden Übersetzungsverhältnisses sei zu der schematischen Darstellung der optischen Registriereinrichtung auf Abb. 1 erwähnt, daß der von einer elektrischen Punktlampe a erzeugte Lichtstrahl nacheinander von den versetzt angeordneten Spiegeln b und c reflektiert wird und auf der mit lichtempfindlichem Papier bespannten Trommel d einen Lichtpunkt von 0,5—1 mm Durchmesser erzeugt.

Der Abstand A_1 der Trommel von dem oberen Spiegel c ergibt sich folgendermaßen:

Das Übersetzungverhältnis K des Martensschen Spiegelapparates ist

$$K = \frac{b}{2\,A} \text{ oder } 2\,A = \frac{b}{K},$$

wenn b die Schneidenbreite des Spiegels und A den Abstand der Spiegelmitte von der Meßlatte bedeutet.

Bei der Hintereinanderschaltung der Spiegel, bei der der Lichtstrahl von beiden Spiegeln reflektiert wird, ist zur Ermittlung der Strecke A_1 folgendes zu berücksichtigen. Der Strecke A (Entfernung Spiegel—Meßlatte) bei der ursprünglichen Anordnung des Martensschen Spiegelapparates entspricht bei Hintereinanderschaltung der Spiegel die vom Lichtstrahl durchlaufene Strecke r (Entfernung Spiegel b, Spiegel c) zuzüglich Strecke A_1 (gesuchte Entfernung Spiegel c, Trommel).

Es ist ferner zu berücksichtigen, daß sich bei Dehnung des Stabes beide Spiegel um denselben Winkel drehen. Entsprechend der Grundregel über den Ein- und Ausfallswinkel im Spiegel muß daher für $2\,A$ gesetzt werden:

$$2\,A = 4\,A_1 + 2\,r$$

$$A_1 = \frac{A - r}{2}$$

Das Übersetzungsverhältnis ergibt sich dann zu

$$K = \frac{b}{2\,r + 4\,A_1}$$

Die verwendeten Meßfedern waren aus Quarzglasstäben hergestellt worden und haben sich während der Dauer sämtlicher Versuche gut bewährt. Wegen des sehr geringen Ausdehnungskoiffizienten von Quarzglas (0,0000005) hatte dieses Material für die Meßfedern Verwendung gefunden.

Um den Probestab auf der gewünschten Temperatur zu halten, diente ein elektrisch beheizter Luftbadofen von 450 mm Länge und 250 mm äußerem Durchmesser. Abb. 2. Da die Meßfedern in den Ofen hineinragen, mußte dieser eine Bohrung von 130 mm erhalten. Auf ein Chamotterohr 1 von 130 mm lichter Weite und 5 mm Wandstärke ist der Heizdraht aufgelegt. Als Heizdraht kam Cekas-Draht von 1 mm Durchmesser zur Verwendung. Dieser Draht ist ein Chrom-Nickel legierter Eisendraht mit einem Widerstand von 1,38 Ohm pro Meter bei 20° C. Die Drahtwickelung war im mittleren Teil mit 8 mm, an den Enden mit 4 mm Abstand aufgelegt worden und wurde mit einer 3 mm starken Schicht von feinem Chamottemehl, das mit Blauton gemischt war, überzogen. Das Ofenrohr ist in einen Blechmantel von 1 mm Wandstärke gebettet, wobei der Zwischenraum zwischen Rohr und Blechmantel mit Asbestwolle dicht ausgefüllt ist.

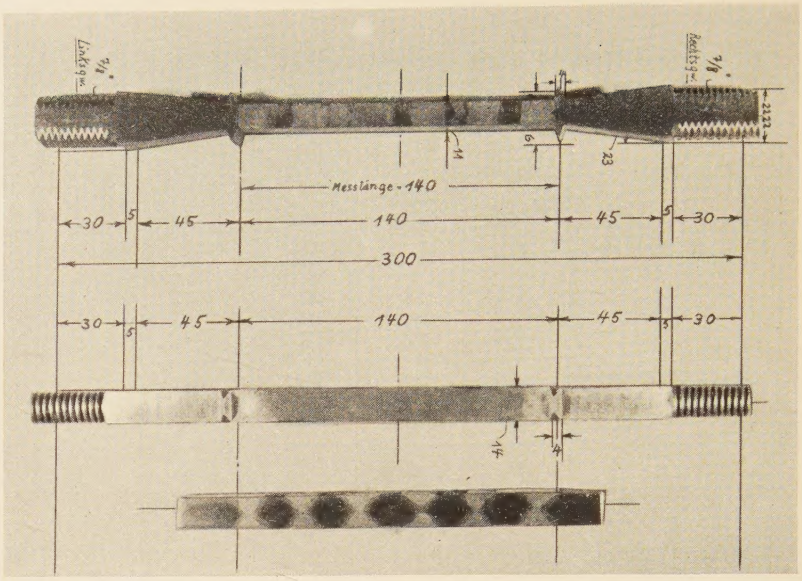
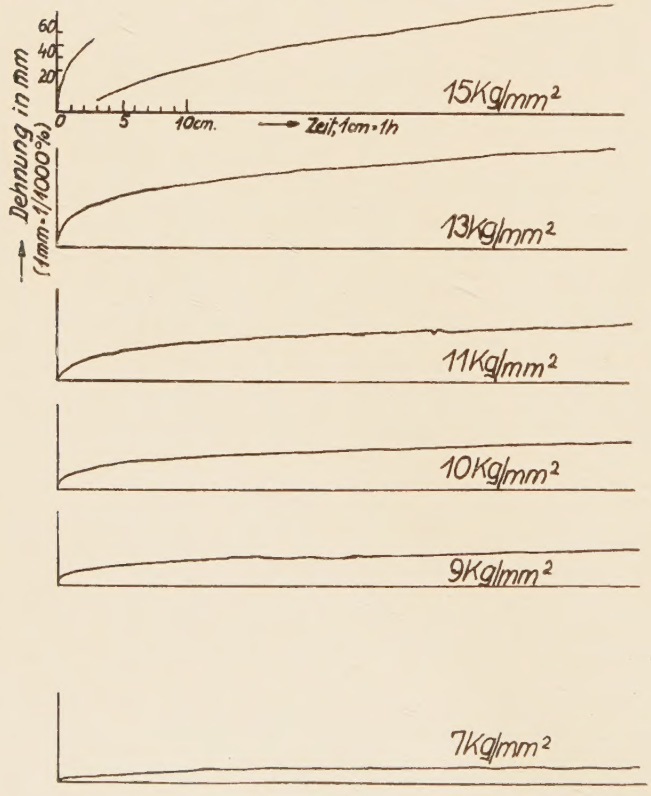


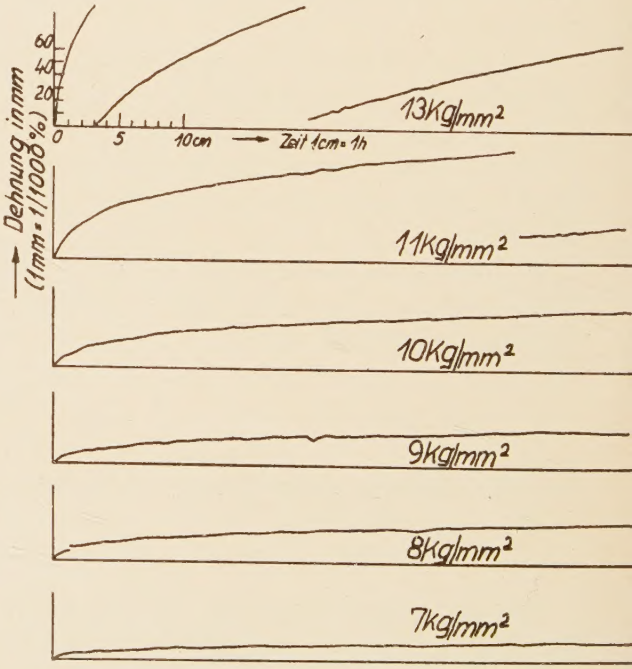
Abb. 3. Versuchsstab mit Schweißnähten

Im Interesse der Genauigkeit der Versuche wurde Wert darauf gelegt, die gleiche Temperatur auf der ganzen Meßlänge des Probestabes zu halten. Diesem Erfordernis trug der Einbau von

Abb. 4. Dehnungszeitschaulinien



Photographierte Diagramme der geschweißten Stäbe. 400° C. (verkleinert) ungeglüht



Photographierte Diagramme der Stäbe aus Flußstahl I (Kesselblech) 400° C. (verkleinert) ungeglüht (Anlieferungszustand)

Tafel 2

Biegefestigkeiten von geschweißten Stäben (Schweißraupe abgearbeitet)

(Versuchseinrichtung nach DIN 4 100) Probeform 250.30.14 mm

Werkstoff	Biegewinkel	Bemerkungen
Stab geschweißt	106°	Biegeversuch quer zur Naht
„ „	152°	„ „ „ „
„ „	180°	„ „ „ „

Tafel 3

Kerbzähigkeit von geschweißten Stäben (Schweißraupe abgearbeitet)

Probeform 160.30.14 mm . Leerlauf = 0; Bärgewicht = 43.21 kg Fallhöhe 1 853 mm

Werkstoff	Schlagarbeit mkg	Spezifische Schlagarbeit mkg/cm²	Bemerkungen
Stab geschweißt	16.8	9.24	Bruch geht durch reine Schweiße
„ „	21.1	11.57	
„ „	20.0	11.23	

2 kleinen Zusatzöfen am oberen und unteren Ende des Luftbadofens Rechnung. Für die Zusatzöfen kam der vorerwähnte Heizdraht von 1 mm Durchmesser zur Verwendung. Der Zusatzofen 2 besteht aus einem feingeriffelten Chamotterohr mit Heizdrahtwickelung, über die eine 5 mm starke Asbestschicht gelegt ist. Auf 1 cm Länge kommen 5 Heizdrahtwindungen zu liegen. Die Länge des Zusatzofens 2 beträgt 125 mm bei 43 mm lichtem Durchmesser und 4 mm Wandstärke. Wegen der Meßfedern mußte der obere Zusatzofen 3 in zwei Teilen ausgeführt werden, was ohne Schwierigkeit möglich war. Zwei Chamotterohrhälften von 155 mm Länge und 4 mm Wandstärke erhielten Heizdrahtwickelung in Längsrichtung. Um ein Berühren der Heizdrahtwindungen untereinander oder mit dem Verlängerungsstück zu verhindern, wurde eine sorgfältige Isolierung mit Glimmer vorgenommen. Die Chamotterohrhälften erhielten noch eine 5 mm starke Asbestschicht von außen aufgelegt. Luftbadofen und Zusatzöfen wurden in bezug auf die Zuführung des Heizstromes (Gleichstrom von 220 V) hintereinandergeschaltet.

Des öfteren angestellte Messungen ergaben die gleiche Temperatur auf der Meßlänge des Probestabes, nur unmittelbar an den Enden der Meßlänge stieg die Temperatur um 1 bis $1^1/_2{}^0$ C an. Erwähnt sei noch, daß die obere und untere Öffnung des Luftbadofens sorgfältig abgedeckt wurde, desgleichen wurden die aus dem Ofen herausragenden Verlängerungsstücke durch Asbestschnur bzw. Asbestwolle gegen Einflüsse von Luftbewegung sorgfältig geschützt.

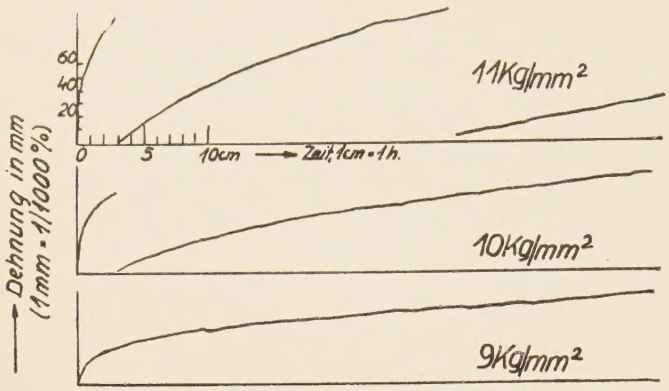
Aus den in verkleinertem Maßstabe wiedergegebenen Diagrammen ist ersichtlich, daß die Versuchstemperatur innerhalb eines Grades konstant gehalten werden konnte. Ermöglicht wurde das Konstanthalten der Temperatur durch einen Temperaturregler, der auf dem Prinzip der Wheatstoneschen Brücke aufgebaut ist[6]).

Die gesamte Versuchseinrichtung kam im Kellergeschoß zur Aufstellung, um Erschütterungen, insbesondere der Prüfmaschine, auf ein möglichst geringes Maß zu beschränken. In bezug auf die Raumtemperatur hatte die Unterbringung im Kellergeschoß in einem dicht abgeschlossenen Raum den Vorteil von nur geringen und ausgeglichenen Schwankungen sowohl während der verschiedenen Jahreszeiten als auch bei plötzlichen Witterungsumschlägen.

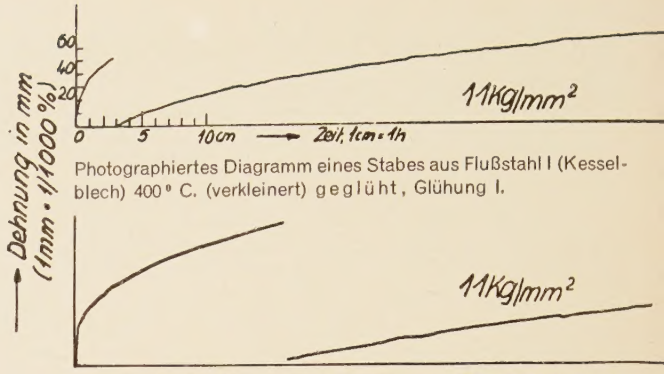
Versuchsmaterial und Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen erstreckten sich auf die Materialien, die in der mittels Elektroschmelzschweißung hergestellten Schweißnaht eine Verbindung eingehen, und auf die Schweißverbindung selbst. Es wurden untersucht:

1. Der Schweißdraht im Anlieferungszustande.
2. Der niedergeschmolzene Schweißdraht (reines Schweißgut).
3. Das Kesselblech (Flußstahl I 35—44 kg/mm² Festigkeit, 27—22% Dehnung).
4. Das Kesselblech mit Schweißnähten im Blech.



Photographierte Diagramme der geschweißten Stäbe, 400° C. (verkleinert) geglüht, Glühung I.



Photographiertes Diagramm eines Stabes aus Flußstahl I (Kesselblech) 400° C. (verkleinert) geglüht, Glühung I.

Photographiertes Diagramm eines Stabes aus Flußstahl I (Kesselblech) 400° C. (verkleinert) geglüht, Glühung III.

Abb. 5. Dehnungszeitschaulinien.

Mit den elektrischen Schweißarbeiten war einer der Schweißer der Firma Främbs & Freudenberg, Schweidnitz[7]), betraut worden, welche die Schweißungen an Kesseln und Druckbehältern der Firma durchführen. Die Schweißnähte im Blech kamen als x Nähte zur Ausführung. Die Schweißraupe wurde bis auf das Blech abgearbeitet, wobei ein Verletzen der Walzhaut nach Möglichkeit vermieden wurde.

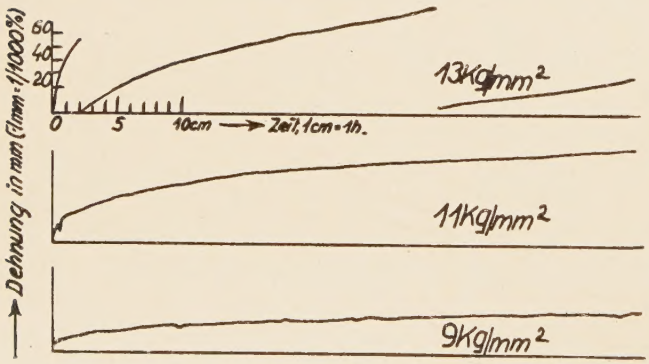
Als Schweißdraht diente eine hochwertige, stark ummantelte Elektrode.

Die Zusammensetzung des Schweißdrahtes und des Kesselbleches ist aus nachstehender Tafel ersichtlich.

	C	P	Mn	S	Si
Schweißdraht	0,09	0,015	0,5	0,02	Spuren
Kesselblech	0,085	0,017	0,47	0,036	—

Der Schweißdraht wurde vom Walzwerk in Form von Rundstäben mit 25 mm Durchmesser angeliefert und daraus Rundstäbe von 14 mm Durchmesser und 140 mm Meßlänge gedreht.

Die Herstellung der Rundstäbe aus niedergeschmolzenem Schweißdraht (reines Schweißgut) geschah in der Weise, daß in ein 24 mm starkes Kesselblech eine Nut von 24 mm Breite und 14 mm Tiefe eingefräst und diese mit Schweißgut ausgefüllt wurde. Derselbe Vorgang kam an der Stelle, die der vorerwähnten Ausfräsung im Blech gegenüber lag, zur Durchführung, so daß sich ein Querschnitt aus reinem Schweißgut von 24 × 24 mm ergab. Es folgte nun das Herausarbeiten von Rundstäben mit den vorerwähnten Abmessungen.



Photographierte Diagramme der geschweißten Stäbe, 400° C. (verkleinert) geglüht, Glühung II.

Abb. 6. Dehnungszeitschaulinien.

Für die Untersuchung des 14 mm starken Kesselbleches und des Kesselbleches mit Schweißnähten im Blech wurden Flachstäbe von 14×11 mm Querschnitt und 140 mm Meßlänge angefertigt. Bei den genannten Abmessungen konnten 6 Schweißnähte innerhalb der Meßlänge angeordnet werden, wie es auf Abb. 3 ersichtlich ist.

Die Anordnung der Schweißnähte geschah in der Weise, daß zwischen den Schweißnähten und den diesen angrenzenden Einflußzonen eine Zone in bezug auf den Gefügeaufbau unbeeinflußtes Blech zu liegen kam. Maßgebend für diese Herstellungsweise war die Überlegung, daß bei Anordnung nur einer Schweißnaht im Blech bei

Tafel 4

Ergebnisse der Dauerstandversuche an Flußstahl I und an geschweißten Stäben

(ungeglüht)

Werkstoff	Belastung kg/mm²	Versuchstemp. °C	Dehngeschwindigkeiten (%/h.10⁻⁵) in der 3—6 h	5—10 h	25—35 h	Gesamtdauer des Versuchs h	Gesamtdehnung %	Dehngeschwindigkeit am Ende des Versuchs (%/h.10⁻⁵)
Stab geschweißt	15	400	450	340	155	47	0.142	—
Stab aus Flußstahl I	13	400	1000	720	260	45	0.25	200
Stab geschweißt	13	400	306	218	85	159	0.12	31
Stab aus Flußstahl I	11	400	386	270	100	479	0.20	13.3
Stab geschweißt	11	400	183	130	42	844	0.12	3
Stab aus Flußstahl I	10	400	233	152	55	390	0.14	8
Stab geschweißt	10	400	160	102	40	608	0.07	3
Stab aus Flußstahl I	9	400	133	100	26	63	0.034	—
Stab aus Flußstahl I	9	400	143	98	31	400	0.06	3
Stab aus Flußstahl I	9	400	133	90	25	798	0.074	0
Stab geschweißt	9	400	140	88	39	312	0.07	5
Stab geschweißt	9	400	137	86	37	763	0.071	0
Stab aus Flußstahl I	8	400	100	60	28	52	0.031	—
Stab aus Flußstahl I	7	400	80	48	20	352	0.029	0
Stab geschweißt	7	400	60	50	—	551	0.033	0

Tafel 5

Ergebnisse der Dauerstandversuche aus niedergeschmolzenem Schweißdraht

(reines Schweißgut) ungeglüht

Stab aus reinem Schweißgut	9	400	293	196	85	474	0.2	12
Stab aus reinem Schweißgut	7	400	233	160	—	340	0.1	4

Tafel 6

Ergebnisse der Dauerstandversuche an Stäben aus Schweißdraht

(Anlieferungszustand)

Stab aus Schweißdraht	10	400	310	210	85	1100	0.21	5
Stab aus Schweißdraht	7.6	400	83	58	26	167	0.05	6

140 mm Meßlänge es nicht leicht möglich gewesen wäre, das Verhalten der Schweißnaht genau festzustellen. Eine Verkleinerung der Meßlänge auf die Breite einer Schweißnaht hätte zur Folge gehabt, daß durch eine so geringe Meßlänge erhebliche Ungenauigkeiten in die Messung hineingekommen wären.

Es mußte also einmal wegen der Meßgenauigkeit und der Vergleichbarkeit der gefundenen Werte mit den Werten der anderen untersuchten Materialien bei den geschweißten Stäben eine Meßlänge von 140 mm beibehalten werden, zum anderen sollte eine genaue Erforschung über das Verhalten der Schweißnaht und der dieser unmittelbar angrenzenden Zone bis zum Übergang in unbeeinflußtes Blechmaterial durchgeführt werden. Diesen beiden Forderungen wurde durch die vorher beschriebene Unterbringung von 6 Schweißnähten in der Meßlänge von 140 mm Rechnung getragen.

Die Dauerstandversuche kamen sämtlich bei konstanter Temperatur (400° C) zur Durchführung. Eine Vorbelastung erfolgte nicht. Die zum Anheizen notwendige Vorwärmzeit betrug 30—40 Stunden. Ein großer Teil der Versuche wurde über längere Zeiträume ausgedehnt. Bei den durchgeführten Versuchen richtete sich das Hauptaugenmerk auf die Prüfung der Stäbe mit den Schweißnähten im Kesselblech und auf die Vollblechvergleichsstäbe. Diese beiden Sorten der Versuchsstäbe wurden in ungeglühtem Zustande und in geglühtem Zustande nach Glühung I ($^1/_2$ Stunde bei 930° C) untersucht, ferner Stäbe mit Schweißnähten im Blech, nachdem sie einer Glühung II ($^1/_2$ Stunde bei 650° C) unterworfen worden waren. Versuchsstäbe aus Schweißdraht (Anlieferungszustand) und aus niedergeschmolzenem Schweißdraht (reines Schweißgut) kamen nur ungeglüht zur Verwendung.

Bei sämtlichen Versuchen war die optische Registriereinrichtung während der Gesamtversuchsdauer in Tätigkeit, so daß für die ganze Versuchszeit eines jeden Versuches Schaulinien vorliegen.

Die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindungen (Anlieferungszustand) waren vorher bei Raumtemperatur durch Zerreiß-, Biege-, Kerbschlag-, Brinell- und mikroskopische Prüfungen untersucht worden.

Für die Zerreiß- und Biegeversuche stellte derselbe geübte Schweißer, welcher die Stäbe mit den Schweißnähten im Kesselblech für die Dauerstandversuche geschweißt hatte, Probestäbe mit einer Schweißnaht im Kesselblech her. Diese Stäbe wurden in derselben Weise und unter gleichbleibenden Bedingungen wie die geschweißten und für den Dauerstandversuch bestimmten Stäbe angefertigt. So wurde dasselbe Kesselblech und dieselbe Elektrode verwendet, dieselbe Nahtform gewählt. Bei einer Breite der Schweißnaht von etwa 20 mm betrug die Meßlänge 30 mm (Schweißnahtbreite + 10 mm). Innerhalb der Meßlänge war der 14 mm starke Probestab 20 mm breit, außerhalb der Meßlänge verbreiterte sich die Probe auf 30 mm.

Die Kerbschlagproben wurden aus drei geschweißten Stäben, die für den Dauerstandversuch bestimmt waren, herausgearbeitet. Bei sechs vorhandenen Schweißnähten in jedem Stab kam die Einkerbung der drei Kerbschlagproben immer in eine andere Schweißnaht zu liegen. Verwendet wurde die große Charpy-Probe mit Abmessungen von 160 × 30 × Blechdicke in mm (14 mm) und einem Bohrungsdurchmesser im Kerbgrund von 4 mm. Der zu durchschlagende Querschnitt betrug 15 × Blechdicke in mm (14 mm).

In den Zahlentafeln 1—3 sind die Ergebnisse der Zerreiß-, Biege- und Kerbschlagversuche zusammengestellt, während die Ergebnisse der Härteprüfung nach Brinell und der mikroskopischen Untersuchungen im Kapitel „Versuchsergebnisse" besprochen werden.

Die Ergebnisse in den Zahlentafeln 1—3 zeigen, daß die für den Dauerstandversuch bestimmten Schweißnähte eine den normalen Anforderungen in jeder Weise entsprechende Verbindung darstellen.

Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Dauerstandversuche sind in den Zahlentafeln 4—9 zusammengestellt und in Abb. 4—6 bildlich veranschaulicht, soweit es sich um die optische Aufzeichnung der Diagramme während der ersten 40—45 Stunden eines jeden Versuches handelt.

Bei einer Anzahl von Diagrammen ist der Verlauf der Schaulinie einmal bzw. mehrmals unterbrochen. Diese Unterbrechungen treten dadurch auf, daß der Lichtpunkt durch Zurückdrehen der Spiegel auf den unteren Teil des lichtempfindlichen Bromsilberpapierstreifens in seine Anfangstellung gebracht wird, wenn zu erwarten steht, daß der Meßbereich der Registriertrommel wegen zu großer Dehnung des Versuchsstabes überschritten bzw. der Lichtpunkt aus dem oberen Spiegel herauswandern wird.

Auf Tafel 4 ist ersichtlich, daß ein Versuch mit einem Stab aus Flußstahl I und 9 kg/mm² Belastung dreimal, ein Versuch mit einem geschweißten Stab und 9 kg/mm² Belastung zweimal zur Durchführung gekommen ist. Bei der bildlichen Veranschaulichung der beiden genannten

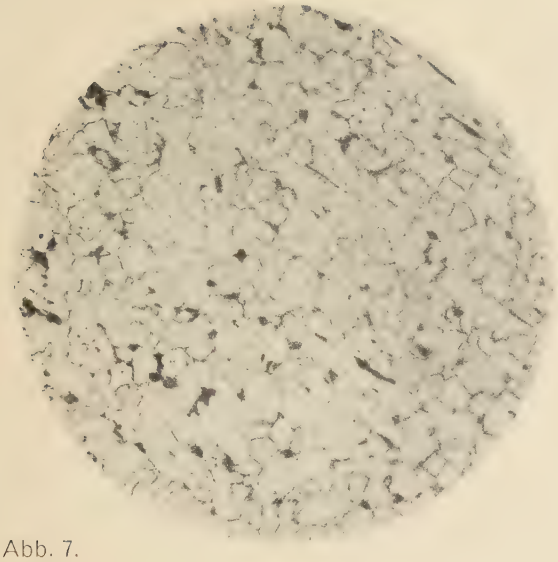


Abb. 7.

Flußstahl I (Kesselblech) Anlieferungszustand.

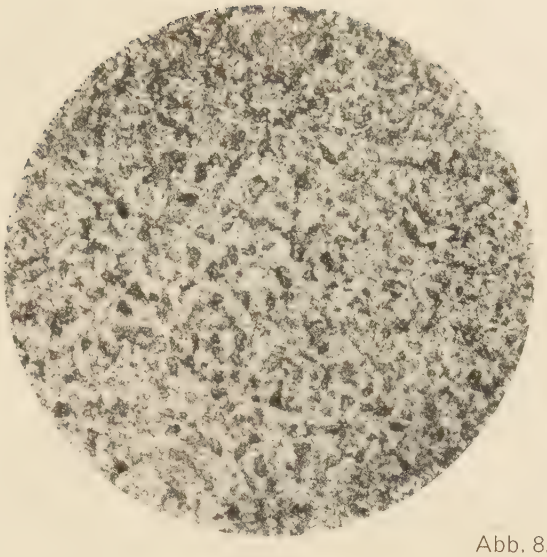


Abb. 8.

Schweißgut in der Schweißnaht (ungeglüht).

Abb. 7 und 8. Gefugebilder einer Elektroschmelzschweißnaht in Flußstahl I (ungeglüht).

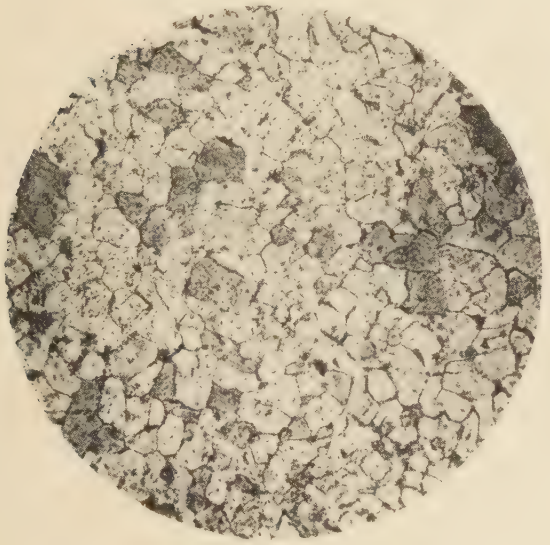


Abb. 9.

Schweißgut in der Schweißnaht.
Glühung I ($^1/_2$ Std. bei 930° C. geglüht).

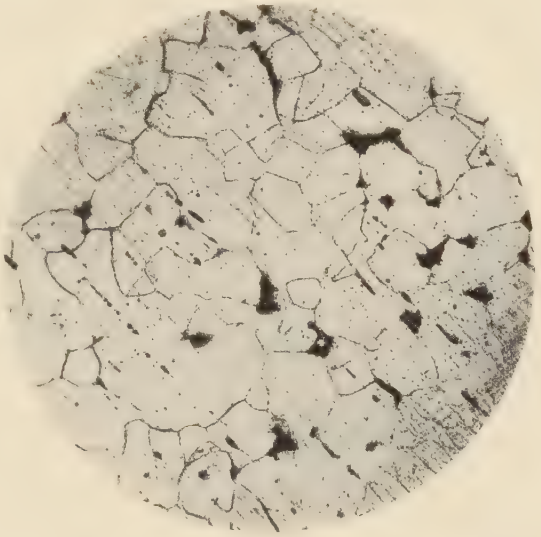


Abb. 10.

Flußstahl I (Kesselblech)
Glühung III (1 Std. bei 1100° C. geglüht).

Abb. 9 und 10. Gefugebilder von Flußstahl I und vom Schweißgut einer Elektroschmelzschweißnaht nach angegebener Wärmebehandlung.

Versuche auf Abb. 4 konnte nur eine Schaulinie dargestellt werden, da die drei bzw. zwei Schaulinien bis auf unbedeutende Schwankungen denselben Verlauf nehmen und sich überdecken. Die mehrfache Durchführung desselben Versuches diente außer noch später zu besprechenden Gründen zum Nachweis der Reproduzierbarkeit der Versuche.

Versuche mit ungeglühten Stäben

Betrachtet man die Versuchsreihen der ungeglühten Stäbe (Zahlentafel 4—6 und Abb. 4), so ist zunächst die große Dehngeschwindigkeit bei den Stäben aus Flußstahl I (Kesselblech) gegenüber den geschweißten Stäben bemerkenswert. Dementsprechend sind die

Dauerstandfestigkeiten der geschweißten Stäbe größer als die der ungeschweißten Stäbe (Zahlentafel 10).

Es wurden ferner, wie bereits erwähnt, Versuche mit dem Schweißdraht im Anlieferungszustande und im niedergeschmolzenen Zustande angestellt. Ein Stab, bestehend aus niedergeschmolzenem Schweißdraht, also reinem Schweißgut, weist bei 9 kg/mm² Belastung Dehngeschwindigkeiten auf, wie sie bei Flußstahl I zwischen einer Belastung von 10 und 11 kg/mm² auftreten. Das Gefüge des niedergeschmolzenen Schweißdrahtes (reines Schweißgut) zeigt im Schliffbild feines Korn und ist sehr ähnlich dem Gefüge, das im Schweißgut der Schweißnaht auftritt. Allerdings wurde im niedergeschmolzenen Schweißdraht Stickstoff festgestellt, was im Schweißgut der Schweißnaht nicht der Fall war.

Man hätte erwarten können, daß die Dehngeschwindigkeitswerte eines geschweißten Stabes zwischen den vorhergenannten Werten von Flußstahl und reinem Schweißgut liegen würden, was aber durch die Versuche widerlegt ist. In der Schweißverbindung findet also keine reine Addition der Eigenschaften des Bleches und des niedergeschmolzenen Schweißdrahtes statt, sondern die Schweißverbindung selbst mit der gewählten Nahtform weist spezifische Eigenschaften auf.

Es ist offenbar gegenüber dem Verhalten des Vollblechvergleichmaterials und des niedergeschmolzenen Schweißdrahtmaterials (reines Schweißgut) im Stab mit Schweißnähten im Kesselblech eine Dehnungsbehinderung zu verzeichnen. Über die Gründe dieser Erscheinung werden die weiter unten beschriebenen Glühversuche Aufschluß geben.

Das bemerkenswerte Verhalten der geschweißten Stäbe gab Veranlassung, die Mehrzahl der Versuche mit diesen Stäben über längere Zeiträume (bis 850 Stunden) auszudehnen. Im Abklingen der Dehnung konnte beim Verfolgen der Schaulinien während der gesamten Versuchsdauer nichts Ungewöhnliches beobachtet werden.

Ermittelt man die Dauerstandfestigkeit der ungeglühten Stäbe mit Schweißnähten im Kesselblech und der ungeglühten Vollblechvergleichsstäbe nach dem Abkürzungsverfahren von Pomp und Enders[5]), wobei als Dauerstandfestigkeit diejenige Belastung angesehen wird, bei der die Dehngeschwindigkeit in der 5. bis 10. Versuchsstunde den Betrag von 0,003 %/Std. nicht überschreitet, so liegt die Dauerstandfestigkeit des Stabes mit Schweißnähten im Kesselblech zwischen 14 und 14,5 kg/mm², die des Vollblechvergleichsstabes (Flußstahl I) zwischen 11 und 11,5 kg/mm² Belastung. Nach dem Knickpunktverfahren nach Juretzek und Sauerwald[3]) liegt die Dauerstandfestigkeit des geschweißten Stabes bei 11,5 kg/mm², des Flußstahl I bei 9,5kg/mm². (Siehe auch Zahlentafel 10.) Die Langdauerversuche ergaben für die betreffenden Werte 10 bis 11, bzw. 9 kg/mm². Über das Verhältnis der nach den verschiedenen Verfahren festgestellten Zahlen zueinander vergl. den letzten Abschnitt.

Versuche mit geglühten Stäben

Der Glühung I ($^1/_2$ Std. bei 930° C) wurden ein Vollblechvergleichsstab (Kesselblech) und drei Stäbe mit Schweißnähten im Kesselblech unterworfen. Der Glühprozeß kam in einem gasbeheizten Muffelofen zur Durchführung. Die Temperatur wurde mit einem Thermoelement aus Platin-Platinrhodium gemessen. Durch Abtasten der zu glühenden Stäbe konnte festgestellt werden, daß die Temperaturunterschiede innerhalb der Meßlänge 5° C nicht überschritten. Nach dem Glühprozeß wurden die Stäbe aus dem Glühofen herausgenommen, das Erkalten erfolgte an ruhender Luft.

Der geglühte Vollblechvergleichsstab unterscheidet sich in seinem Verhalten unter Dauerstandbelastung bei 11 kg/mm² unwesentlich von dem ungeglühten Vollblechvergleichsstab bei derselben Belastung. Dieser geringe Unterschied im Verhalten der beiden Vollblechvergleichsstäbe kommt deutlich zum Ausdruck, wenn man die Zeitdehnungskurven dieser Versuche nach dem Abkürzungsverfahren zur Ermittlung der Dauerstandfestigkeit von Pomp und Enders[5]) auswertet. Nach dieser Auswertung liegt die Dauerstandfestigkeit des ungeglühten Vollblech-

Tafel 7

Ergebnisse der Dauerstandversuche an Flußstahl I und an geschweißten Stäben nach Glühung I ($^1/_2$ Std. bei 930° C geglüht)

Werkstoff	Belastung kg/mm²	Versuchstemp. °C	Dehngeschwindigkeiten ($^0/_0$/h.10^{-5}) in der 3—6 h	5—10 h	25—35 h	Gesamtdauer des Versuchs h	Gesamtdehnung $^0/_0$	Dehngeschwindigkeit am Ende des Versuchs ($^0/_0$h.10^{-5})
Stab aus Flußstahl I	11	400	423	300	117	193	0.184	30
Stab geschweißt	11	400	750	550	210	76	0.266	130
Stab geschweißt	10	400	443	318	130	176	0.226	41
Stab geschweißt	9	400	250	150	62	583	0.156	8

Tafel 8

Ergebnisse der Dauerstandversuche an geschweißten Stäben nach Glühung II
($^1/_2$ Std. bei 650 °C geglüht)

Stab geschweißt	13	400	550	410	177	243	0.296	65
Stab geschweißt	11	400	273	196	70	140	0.113	29
Stab geschweißt	9	400	106	76	38	49	0.034	33

Tafel 9

Ergebnisse eines Dauerstandversuches an Flußstahl I nach Glühbildung III
(1 Std. bei 1100° C geglüht)

Stab aus Flußstahl I	11	400	566	396	147	481	0.296	15

vergleichsstabes zwischen 11 und 11,5 kg/mm² Belastung, die des nach Glühung I geglühten Vollblechvergleichsstabes bei 11 kg/mm² Belastung. Die halbstündige Glühung bei 930° C ist demnach fast ohne Wirkung auf das Vollblechvergleichsmaterial geblieben. Der Grund dafür dürfte in dem Umstand zu erblicken sein, daß das Vollblechvergleichsmaterial (Kesselblech) vom Walzwerk als in gutem Glühzustand befindlich angeliefert wurde und durch den erneuten Glühprozeß wenig beeinflußt worden ist. Es konnte daher auch im Schliffbild keine wesentliche Veränderung im Gefügeaufbau zwischen dem ungeglühten und dem geglühten Vollblechvergleichsmaterial beobachtet werden. Korngröße und Perlitverteilung entspricht ganz der des Anlieferungszustandes. Abb. 7.

Kugeldruckversuche mit einer Kugel von 5 mm Durchmesser und mit einer Belastung von 750 kg bei 30 sec Dauer ergaben am ungeglühten Vollblechvergleichsmaterial eine Brinellhärte von 107,7, am geglühten Vollblechvergleichsmaterial von 98,8. Diese Werte stellen das Mittel aus je 4 Einzelwerten dar, die befriedigend übereinstimmten.

Wesentlich anders verhalten sich die Stäbe mit den Schweißnähten im Kesselblech, nachdem sie der Glühung I unterworfen worden sind. Zeigten diese Stäbe vor der Glühung eine geringere Dehngeschwindigkeit als die Vollblech-Vergleichsstäbe, so treten nach der Glühung sogar etwas größere Dehngeschwindigkeiten als bei den entsprechenden Vollblech-Vergleichsstäben auf.

Die Dauerstandfestigkeit, ermittelt nach dem Abkürzungsverfahren von Pomp und Enders[5]), liegt bei den ungeglühten Stäben mit Schweißnähten im Kesselblech, wie bereits erwähnt, zwischen 14 und 14,5 kg/mm², bei den nach Glühung I geglühten Stäben mit Schweißnähten im Kesselblech zwischen 9,5 und 10 kg/mm² Belastung (siehe auch Zahlentafel 10).

Dieses unterschiedliche Verhalten findet seinen Grund in dem durch den Glühprozeß erfolgten Spannungsausgleich und der eingetretenen Gefügeveränderung in den Schweißzonen, worüber im folgenden weitere Versuchsergebnisse mitgeteilt werden.

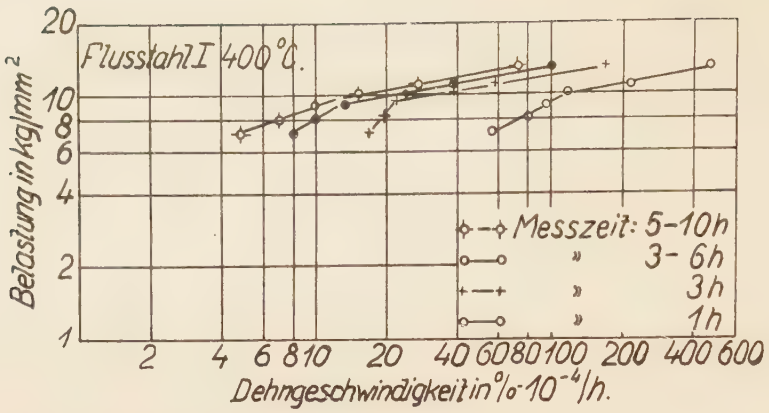


Abb. 11. Ermittelung der Belastung am Unstetigkeitspunkt durch Darstellung der Ergebnisse von Einzelversuchen an Flußstahl I (ungeglüht) (Zahlentafel 4).

Die Herstellung einer Elektroschmelzschweißnaht ist mit hohen örtlichen und zeitlichen Temperaturgefällen verbunden. Die damit von Faser zu Faser auftretenden sehr unterschiedlichen Wärmedehnungen[8]) haben in der Schweißnaht dreiachsige Spannungszustände zur Folge, die sehr unterschiedliche Verteilung und Höhe haben können. Im vorliegenden Falle bleiben allerdings nur Spannungen senkrecht zur Naht stehen, da aus den verschweißten Blechen die geschweißten Stäbe quer zur Naht herausgearbeitet wurden. Hier konnten also Spannungen, wie sie beim Schweißen von Behältern oder beim Schweißen von Eisenkonstruktionen (Bauspannungen) zusätzlich aufzutreten pflegen, nicht zur Wirkung kommen. Immerhin können offenbar auch die verbliebenen Spannungen eine Behinderung des Fließens herbeiführen.

Die Größe der Spannungen kann durch verschiedene Faktoren beeinflußt werden. Unrichtige Wahl des Zusatzwerkstoffes (Elektrode) bewirkt Spannungserhöhung. Der Zusatzwerkstoff ist richtig gewählt, wenn er in niedergeschmolzenem Zustande möglichst die gleichen Festigkeitseigenschaften hat wie der zu verschweißende Blechwerkstoff. Anderenfalls hat nach Bollenrath[9]) der Zusammenbau zweier Werkstoffe mit verschiedenen Festigkeitseigenschaften eine Störung der Spannungsverteilung in Nahtnähe zur Folge, was wiederum ein Grund für die merkwürdige Bruchausbildung neben Schweißnähten ist. Dem Blechwerkstoff werden durch den Nahtwerkstoff mit höherer Streckgrenze unnatürlich hohe Beanspruchungen infolge behinderter Formänderung aufgezwungen.

Die Spannungen können ferner im günstigen oder ungünstigen Sinne außer durch die bereits besprochenen Festigkeitseigenschaften des Zusatzwerkstoffes (Elektrode) auch durch die Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffes, durch die gewählte Nahtform, durch die Fähigkeiten des Schweißers und die Reihenfolge der Schweißarbeiten beeinflußt werden.

Durch das Herausarbeiten der für die Dauerstandversuche bestimmten Probestäbe aus dem geschweißten Blech dürften die Spannungen in Richtung der Schweißnaht (Längsspannungen), die erhebliche Ausmaße im zusammenhängenden Blech annehmen können, gering sein. Durch den Glühprozeß nach Glühung I sind also in der Hauptsache die Spannungen senkrecht zur Nahtrichtung behoben worden. Wieviel die inneren Spannungen die Dauerstandfestigkeit beeinflussen, kann durch eine Glühung II gezeigt werden, bei der nicht wie bei Glühung I auch das Gefüge, sondern nur die Spannungen geändert werden.

Es wurden 3 Stäbe mit Schweißnähten im Kesselblech einer Glühung II ($^1/_2$ Std. bei 650° C) unterworfen und unter Dauerstandbelastung bei 400° C untersucht. Die Glühung war mit den bereits beschriebenen Vorrichtungen ausgeführt worden. Die Dauerstandfestigkeit der Stäbe mit Schweißnähten im Kesselblech nach Glühung II wurde nach Pomp und Enders bei 12 kg/mm² ermittelt (siehe Zahlentafel 8 u. 10). Im Schliffbild zeigte der Gefügeaufbau weder im Schweißgut der Schweißnähte, noch in der Übergangszone, noch im Kesselblech eine Veränderung gegenüber dem Gefügeaufbau des ungeglühten geschweißten Stabes. Die Untersuchung des Perlits bei 950facher Vergrößerung ergab, daß durch die Glühung II keinerlei Veränderung eingetreten war. Erfolgt ist also durch die Glühung II nur ein Spannungsausgleich, der bei dieser Glühtemperatur einer Spannungsfreiheit gleichen oder ihr wenigstens nahekommen dürfte.

Tafel 10

Dauerstandfestigkeit von Flußstahl I (Kesselblech) und von geschweißten Stäben in ungeglühtem Zustande und nach verschiedener Wärmebehandlung

Werkstoff	Temp. °C.	Dauerstandfestigkeit ermittelt		
		nach dem Abkürzungsverfahren von Pomp und Enders[1]) kg/mm²	nach dem Knickpunktverfahren von H. Juretzek und F. Sauerwald[2]) kg/mm²	durch Langdauerversuch mit Enddehngeschwindigkeit = $1 \cdot 10^{-5}$ %/h. kg/mm²
ungeglüht { Stab aus Flußstahl I	400	zwischen 11 u. 11.5	9.5	9
ungeglüht { Stab geschweißt . .	400	zwischen 14 u. 14.5	11.5	> 10, wahrscheinlich 10—11
Glühung I { Stab aus Flußstahl I	400	11	—	—
Glühung I { Stab geschweißt . .	400	9.8	—	< 9
($^1/_2$ Std. bei 930° C. geglüht)				
Glühung II { Stab geschweißt . .	400	12	—	—
($^1/_2$ Std. bei 650° C. geglüht)				

[1]) Mitt. K.W. Inst. Eisenforsch. XII, 1930, Lieferung 10, Abh. 152, S. 127.
[2]) H. Juretzek u. F. Sauerwald, Z. Physik 1933, 83, S. 483.

Vergleicht man nach dem Vorhergesagten auf Zahlentafel 10 die Dauerstandfestigkeiten der Stäbe mit Schweißnähten im Kesselblech im ungeglühten Zustande, nach Glühung I und nach Glühung II, so ergibt sich daraus, daß das durch Glühung I eingetretene Absinken der Dauerstandfestigkeit um über 4 kg/mm² gegenüber dem ungeglühten geschweißten Stabe etwa zur einen Hälfte durch den erfolgten Spannungsausgleich hervorgerufen worden ist.

Die Veränderung, die der Gefügeaufbau in den Stäben mit Schweißnähten im Kesselblech durch den Glühprozeß I erfahren hat, ist aus den Abbildungen 7—9 durch entsprechenden Vergleich ersichtlich. Wie bereits erwähnt, ist die Glühung I auf das Kesselblech (Flußstahl I) im Vollblech-Vergleichsstab ohne wesentlichen Einfluß geblieben, und zwar aus Gründen, die bereits besprochen worden sind. Dasselbe gilt für das Kesselblech (Flußstahl I), das im geschweißten Stab zwischen den Schweißnähten gelagert und vom Schweißprozeß unbeeinflußt geblieben ist, d. h. außerhalb der sogenannten Übergangszone liegt, welche sich am Übergang zwischen Schweiße und Blech befindet.

Deutlich tritt dagegen der Einfluß der Glühung I auf das Schweißgut der Schweißnaht in Abbildung 9 (geglüht) gegenüber Abbildung 8 (ungeglüht) in Erscheinung. An Stelle des feinen Kornes (ungeglüht) ist ein wesentlich gröberes Korn (geglüht) getreten. Dieses gleicht sich in bezug auf seine Größe stark der Korngröße des Blechwerkstoffes (Flußstahl I) an. Bei dem geringen Kohlenstoffgehalt des Schweißdrahtes (0,09% C) ist es schwer möglich, einen Kohlenstoffverlust durch den Schmelzprozeß im Schliffbild festzustellen, man kann deshalb damit rechnen, daß ein nur kleiner, nicht ins Gewicht fallender Teil des Kohlenstoffes beim Schweißen herausgebrannt ist.

Die Übergangszone einer ungeglühten Schweißnaht, die an der Berührungsstelle von Schweiße und Blech liegt, zeigt im Schliffbild ein Gemisch von verschieden großem Korn. Diese Zone entsteht dadurch, daß durch den Lichtbogen das Blechmaterial des Nahtrandes aufgeschmolzen wird. Es sind in dieser Zone Körner anzutreffen, welche in bezug auf ihre Größe teils die auf Abbildung 7, teils die auf Abbildung 8 dargestellte Korngröße und Zwischenstufen aufweisen. Nach dem Glühprozeß I ist die beschriebene Gefügeausbildung dieser Übergangszone nicht mehr wahrzunehmen, das Gefüge hat sich dem angrenzenden Gefüge angeglichen.

Der nach Glühung I geglühte Stab mit Schweißnähten im Kesselblech weist also in bezug auf den ungeglühten Gleichmäßigkeit des Gefüges auf.

Der Kugeldruckversuch nach Brinell ergab bei einem Kugeldurchmesser von 5 mm und einer Belastung von 750 kg bei 30 Sekunden Dauer folgende Werte:

	Kesselblech (Flußstahl I)	Übergangszone	Schweißgut in der Schweißnaht
ungeglüht	107,7	110,2	130
geglüht, Glühung I	98,8	—	113,2

Diese Werte stellen das Mittel aus je vier Einzelwerten dar, die befriedigend übereinstimmten.

Der Glühprozeß nach Glühung I hat beim Stab mit Schweißnähten im Kesselblech ein erhebliches Absinken der Dauerstandfestigkeit zur Folge gehabt. Wie bereits gesagt, liegt die Dauerstandfestigkeit (nach Pomp und Enders) des ungeglühten, geschweißten Stabes zwischen 14 und 14,5 kg pro mm² Belastung, die des nach Glühung I geglühten zwischen 9,5 und 10 kg pro mm² (siehe Zahlentafel 10). Wie weiter oben erwiesen ist, wird das Absinken etwa zu einer Hälfte durch den Spannungsausgleich der Spannungen (siehe Versuche mit geschweißten Stäben nach Glühung II weiter oben) hervorgerufen, wobei dieser Spannungsausgleich etwa einer Spannungsfreiheit gleichen oder ihr wenigstens nahekommen dürfte. Zur anderen Hälfte bedingt offenbar die Gefügeveränderung des Schweißgutes der Schweißnaht — hier Kornvergröberung — das Absinken der Dauerstandfestigkeit. Diese letzte Feststellung steht in scheinbarem Widerspruch zu den Ergebnissen einer neueren Forschungsarbeit des Kaiser-Wilhelm-Institutes für Eisenforschung zu Düsseldorf[10]).

Es wurden dort zwei Stähle mit folgender Zusammensetzung untersucht:

	C %	Si %	Mn %	P %	S %
Stahl A	0,21	0,17	0,62	0,035	0,035
Stahl B	0,37	0,31	0,67	0,027	0,028

Die Wärmebehandlung erstreckte sich auf den Normal-Glühprozeß und auf Glühungen bei 1050° C, 1200° C und 1300° C. Bei beiden untersuchten Stählen steigt die Dauerstandfestigkeit, wenn auch in verschiedenem Maße, bei höheren über dem Normal-Glühprozeß liegenden Glühtemperaturen an, wobei der Gefügeaufbau mit steigenden Temperaturen eine deutliche Kornvergröberung im Schliffbild erkennen läßt. In Zahlentafel 11 sind die Ergebnisse der Dauerstandversuche an den Stählen *A* und *B* zusammengestellt. Bei diesen Stählen steigen also die Dauerstandfestigkeiten mit der durch Überhitzung erzielten Kornvergröberung. Es wurde nun von uns geprüft, ob das von uns untersuchte weichere Kesselblech sich schon im nichtgeschweißten Zustande etwa anders verhielt. Daher wurde ein Vollblechvergleichsstab (Flußstahl I) einer Glühung III (1 Stunde bei 1100° C) unterworfen. Die Glühung III erfolgte mit denselben Vorrichtungen wie die Glühung I, deren Durchführung bereits näher beschrieben ist. Es war nun möglich, die Eigenschaften eines Vollblechvergleichsstabes (Flußstahl I) nach Glühung I (Normal-Glühprozeß) den Eigenschaften eines Vollblechvergleichsstabes (Flußstahl I) nach Glühung III gegenüber zu stellen.

Die Dauerstandfestigkeit, ermittelt nach dem Abkürzungsverfahren von Pomp und Enders[5]), liegt bei einem nach Glühung I geglühten Stabe aus Flußstahl I und 400° C bei 11 k/mm² Belastung, wobei die Dehngeschwindigkeit in der 5. bis 10. Stunde $300 \cdot 10^{-5}$%/Std. beträgt. Ein nach Glühung III geglühter Stab aus Flußstahl I weist aber bei 400° C und gleicher Belastung

Tafel 11

Dauerfestigkeit bei 500° der Stähle A und B in verschiedenen Glühzuständen

Stahl	Dauerstandfestigkeit bei 500° kg/mm²			
	Normal-geglüht	1 Stunde bei 1050°	1 h bei 1200°	1 h bei 1300°
A	8.7	10.1	10.0	10.0
B	4.2	6.9	9.5	10.5

in der 5. bis 10. Versuchsstunde eine höhere Dehngeschwindigkeit auf, und zwar 396 . 10^{-5}%/Std. (siehe auch Zahlentafel 7 und 9, ferner Abbildung 5). Daraus geht hervor, daß die Dauerstandfestigkeit durch den Glühprozeß III abgesunken ist. Im Gefüge ist durch die Glühung III eine Kornvergröberung eingetreten, die aus Abbildung 10 ersichtlich ist (vergleiche damit Abbildung 7). Aus der bereits angegebenen Zusammensetzung der vom K.W.I. für Eisenforschung für die Versuche verwendeten Stähle *A* und *B* geht hervor, daß Stahl *A* einen *C*-Gehalt von 0,21 %, Stahl *B* von 0,37% aufweist. Stahl *B* mit dem höheren *C*-Gehalt hat in bezug auf die Dauerstandfestigkeit durch Glühung mit steigenden Temperaturen erheblich stärker zugenommen als Stahl *A* mit dem geringeren *C*-Gehalt (siehe Zahlentafel 11). Da das hier verwendete Material (Flußstahl I) durch die Glühung bei 1100° C und eingetretener Kornvergröberung eine geringere Dauerstandfestigkeit aufweist, läßt dies die Vermutung aufkommen, daß der sehr geringe *C*-Gehalt des Flußstahl I (0,085%) das Ergebnis in der gefundenen Weise beeinflußt hat und weiche Materialien sich offenbar anders verhalten als härtere. Infolgedessen kann man auch annehmen, daß die Kornvergröberung bei Glühung der Schweiße auch die Dauerstandfestigkeit der Schweißverbindung herabsetzt. (Bemerkenswert für die Frage ist jedoch die Näherung der Enddehngeschwindigkeiten von Flußstahl I, Belastung 11 kg/mm², ungeglüht und Glühung III.)

Das Knickpunktverfahren

Das in den vorstehenden Ausführungen mehrfach angeführte Abkürzungsverfahren des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Eisenforschung zu Düsseldorf[5]) zur Ermittelung der Dauerstandfestigkeit beruht auf konventionellen Festsetzungen bestimmter Größen der Dehngeschwindigkeiten in verschiedenen Abschnitten der ersten 35 Versuchsstunden. Die Dauerstandfestigkeit soll dann als erreicht angesehen werden, wenn die Dehngeschwindigkeit nach Lastaufgabe im Zeitraum der

3.— 6. Stunde 0,005 % pro Stunde
5.—10. „ 0,003 % „ „
25.—35. „ 0,0015 % „ „

beträgt, bzw. in möglichster Nähe der angegebenen Werte liegt, ohne die für die 5.—10. und 25.—35. Stunde genannten Werte zu überschreiten. Die Bestimmung der Dehngeschwindigkeit im Zeitabschnitt der 5.—10. Versuchsstunde wird als besonders zweckmäßig angesehen, da dieser Zeitabschnitt gegenüber dem der 3.—6. Stunde den Vorteil größerer Meßgenauigkeit bietet.

Betrachtet man in Zahlentafel 4 die Ergebnisse des Versuches mit einem Stab aus Flußstahl I und 11 kg/mm² Belastung, so ist festzustellen, daß die Dehngeschwindigkeiten in der 3.—6. Stunde, in der 5.—10. Stunde und in der 25.—35. Stunde die vorgenannten Werte noch nicht erreicht haben.

Die Dehngeschwindigkeit in der 5.—10. Stunde beträgt nur 270 . 10^{-5}, während sie 300 . 10^{-5} betragen dürfte. Nach dem Abkürzungsverfahren des K. W. I. für Eisenforschung liegt also die Dauerstandfestigkeit etwas höher, etwa zwischen 11 und 11,5 kg/mm² Belastung. Und doch weist der Versuch bei 11 kg/mm² Belastung schon nach 479 Versuchsstunden eine Gesamtdehnung (bleibende Dehnung) von 0,2 % auf, wobei am Ende des Versuches die Dehngeschwindigkeit 13 . 10^{-5}%/Std. beträgt. Nach der angegebenen Versuchszeit ist also die 0,2-%-Grenze, die man im allgemeinen als Grenze erheblicher Formänderungen wird ansehen können, bereits erreicht, ohne daß mit einem baldigen Zurruhekommen des Versuchsmaterials zu rechnen wäre.

Ganz ähnliche Beobachtungen wurden bei einem Stab aus Flußstahl I und 11 kg/mm² Belastung nach Glühung I und bei einem geschweißten Stab mit 10 kg/mm² Belastung nach dem gleichen Glühprozeß gemacht (Zahlentafel 7). Im ersteren Falle ist schon nach 193 Versuchsstunden die Gesamtdehnung (bleibende Dehnung) sehr nahe der 0,2-%-Grenze gekommen (0,184 %), bei einer Enddehngeschwindigkeit von 30 . 10^{-5} %/Std. ist bei längerer Versuchsdauer mit einem baldigen Überschreiten der 0,2-%-Grenze zu rechnen. Im zweiten Falle liegt zwar die Dehngeschwindigkeit in der 5.—10. Stunde etwas über dem vorgeschriebenen Werte (318 gegenüber 300 . 10^{-5} %/Std.), während die vorgeschriebene Dehngeschwindigkeit in der 25.—35. Stunde unterschritten ist. Schon nach 176 Versuchsstunden betrug die Gesamtdehnung (bleibende Dehnung) 0,226 % bei einer Enddehngeschwindigkeit von 41 . 10^{-5} %/Std. Bemerkenswert erscheinen noch die beobachteten Versuchsergebnisse an einem Stab aus reinem Schweißgut und 9 kg/mm² Belastung (Zahlentafel 5) und an einem Stab aus Schweißdraht (Anlieferungszustand) bei 10 kg/mm² Belastung (Zahlentafel 6). In beiden Fällen sind die vorgeschriebenen Dehngeschwindigkeiten in den vorgenannten Zeitabschnitten erheblich unterschritten, trotzdem wird im ersteren Falle nach 474 Versuchsstunden die 0,2-%-Grenze (bleibende Dehnung) erreicht, während sie im letzteren Falle nach 1100 Versuchsstunden überschritten wurde.

Da nach den vorbeschriebenen gemachten Beobachtungen der für die Ermittelung der Fließgrenze übliche Dehnungswert von 0,2 % der Meßlänge überschritten worden ist, müßten die im Abkürzungsverfahren des K. W. I. für Eisenforschung ermittelten Dauerstandfestigkeitswerte bei Verwendung als Berechnungsunterlagen mit einem vergleichsweise hohen Sicherheitsfaktor ausgestattet werden. Über die Größe des Sicherheitsfaktors in bezug auf die notwendige Sicherheit und die anzustrebende Wirtschaftlichkeit sind jedoch schwer genaue Angaben zu machen, um neben möglichster Ausnutzung des Materials die Überschreitung von 0,2 % Dehnung, die im allgemeinen als nicht erwünscht angesehen werden kann[11]), auszuschließen.

Nachdem in der letzteren Zeit ein neues Verfahren zur Ermittelung der Dauerstandfestigkeit auf rationeller Grundlage, das mit verhältnismäßig kurzer Versuchsdauer und geringem Materialaufwand verbunden ist, von H. Juretzek und F. Sauerwald[2]) in Vorschlag gebracht wurde, bot sich Gelegenheit, die Versuchsergebnisse für die Stäbe aus Flußstahl I (ungeglüht) und die geschweißten Stäbe (ungeglüht) (Zahlentafel 4) auch für die Ermittelung der Dauerstandfestigkeit nach dem neuen Verfahren zu verwenden, wodurch es möglich wurde, die Dauerstandfestigkeitswerte dieser beiden Materialien, ermittelt nach Juretzek und Sauerwald, den Werten ermittelt nach Vorschlag des K. W. I. für Eisenforschung gegenüber zu stellen.

Das neue Verfahren bedarf zur Ermittelung der Dauerstandfestigkeit nicht unbedingt der Absolutwerte der Dehngeschwindigkeiten, da es die Zunahme der Dehngeschwindigkeiten in Beziehung setzt. Diese Zunahme ist unter einer bestimmten Belastung gering, nach Überschreitung dieser steigt die Zunahme der Dehngeschwindigkeit stark an, und es ergibt sich in der bildlichen Darstellung der Kurven ein Unstetigkeitspunkt oder Knickpunkt. Analysiert man die Kurven mathematisch, stellt man sie beispielsweise auf doppellogarithmischem Papier dar, so erhält man zwei Gerade, ihr Schnittpunkt ergibt den Unstetigkeitspunkt, der zur Ermittelung der Dauerstandfestigkeit benutzt werden soll. Ausführliches über das Verfahren ist aus der bereits angeführten Forschungsarbeit von Juretzek und Sauerwald[3]) zu entnehmen.

Wie bereits ausgeführt, wertet das neue Verfahren die Zunahme der Dehngeschwindigkeiten aus, es ist daher zur Ermittelung der Dauerstandfestigkeit auch die Benutzung eines Versuchsstabes möglich und vorgeschlagen, welcher stufenweise belastet werden soll. Da für die vorliegende Arbeit Versuche in genügender Zahl von Stäben aus Flußstahl I (ungeglüht) und geschweißten Stäben (ungeglüht) vorlagen, wurden für die Ermittelung der Dauerstandfestigkeit nach dem neuen Verfahren die Dehngeschwindigkeitswerte der Einzelversuche verwendet (Zahlentafel 4).

Der Unstetigkeitspunkt oder Knickpunkt und damit die Dauerstandfestigkeit, nach dem Verfahren von Juretzek und Sauerwald[3]) ermittelt, liegt für Flußstahl I im Mittel bei 9,5 kg/mm²,

für den geschweißten Stab im Mittel bei 11,5 kg/mm² (siehe auch Zahlentafel 10). Die bildliche Darstellung der erhaltenen Kurven ist aus Abbildung 11 ersichtlich. Vier Meßzeiten (1. Stunde, 3. Stunde, 3.—6. Stunde, 5.—10. Stunde) wurden für die Ermittelung der Dauerstandfestigkeit herangezogen. Für Flußstahl I (Abbildung 11) schwanken die durch den Knickpunkt oder Unstetigkeitspunkt ermittelten Belastungen zwischen 9,9 und 9,3 kg/mm², wobei zu bemerken ist, daß der aus der Messung der Dehngeschwindigkeit in der ersten Stunde ermittelte Wert bei 9,9 kg/mm² liegt, während die anderen Werte bei 9,4 bzw. 9,3 bzw. 9,6 kg/mm² zu liegen kommen. Die mit gewissen Schwierigkeiten bzw. Ungenauigkeiten verbundene Ermittelung der Dehngeschwindigkeit in der ersten Versuchsstunde dürfte den gefundenen Wert beeinflußt haben. Die Knickpunkte sind bei allen vier Kurven deutlich ausgeprägt. Einwandfreie Dehnungszeitschaulinien sind die Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens.

Für den geschweißten Stab liegen die durch den Knickpunkt ermittelten Belastungen bei 11,6, 11,8, 11,2 und 11,3 kg/mm².

Die mit 9,5 kg/mm² durch das Knickpunktverfahren ermittelte Dauerstandfestigkeit des Flußstahl I (ungeglüht) gab Veranlassung, einen Langdauer-Versuch mit diesem Material bei 9 kg/mm² Belastung — also dicht unter der ermittelten Dauerstandfestigkeit — durchzuführen. Dieser Versuch kam nach 798 Stunden zur Ruhe, wobei die Gesamtdehnung (bleibende Dehnung) 0,074 % betrug (Zahlentafel 4). Da der Versuch mit 10 kg/mm² nach 390 Stunden noch eine Dehnung von $8 \cdot 10^{-5}$ %/Std. zeigte und bereits eine Gesamtdehnung von 0,14 % erreicht war, so steht der Wert des Knickpunktverfahrens von 9,5 kg/mm² in guter Übereinstimmung mit dem Langdauerversuch. Obgleich die Dauerstandfestigkeit des geschweißten Stabes durch das Knickpunktverfahren bei 11,5 kg/mm² Belastung ermittelt worden war, schien es zunächst von praktischem Werte zu sein, zu wissen, ob auch der geschweißte Stab bei 9 kg/mm² Belastung zur Ruhe kommt, also bei derselben Belastung, die bei Flußstahl I zu einem Zurruhekommen geführt hatte. Ein Langdauer-Versuch mit einem geschweißten Stab (ungeglüht) und 9 kg/mm² Belastung führte zu dem Ergebnis, daß dieser Versuch nach 763 Stunden bei einer Gesamtdehnung von 0,071 % absolut zur Ruhe kam. Die Dauerstandfestigkeit liegt auch nach den Langdauerversuchen höher als 9 kg/mm², und zwar zwischen 10 und 11 kg/mm², nahe bei 11 kg/mm², da der Langversuch mit 11 kg/mm² eine Enddehnung von $3 \cdot 10^{-5}$ %/Std. aufwies. Das Knickpunktverfahren hatte hier 11,5 kg/mm² angegeben. Diese Vergleiche zeigen mit besonderer Deutlichkeit, daß das Knickpunktverfahren der wahren Dauerstandfestigkeit sehr nahe kommt.

Vergleicht man die Dauerstandfestigkeitswerte, ermittelt nach dem Abkürzungsverfahren des K. W. I. für Eisenforschung[5]), mit den nach dem Knickpunktverfahren von Juretzek und Sauerwald[3]) ermittelten Werten (Zahlentafel 10), so ergibt sich die Feststellung, daß letztere tiefer zu liegen kommen, d. h. daß durch das Knickpunktverfahren eine schärfere Beurteilung des Materials stattgefunden hat. Welche Vorteile dem Konstrukteur aus der Kenntnis des Zurruhekommens des Materials bei geringer Gesamtdehnung (bleibender Dehnung) erwachsen können, darüber wird anderen Orts[3]) folgendes gesagt:

> „Eine schärfere Beurteilung kann nur dienlich sein für den Konstrukteur, besonders wenn er den großen Vorteil hat, eine wirkliche Materialkonstante an die Hand zu bekommen. Der Konstrukteur ist immer in der Lage, die scharfe Beurteilung bei der Abnahmeprüfung des Werkstoffs durch eine dann gerechtfertigte Herabsetzung der Sicherheitsfaktoren auszugleichen, so daß in der Verwendbarkeit der Werkstoffe keine Schwierigkeiten entstehen."

Das Knickpunktverfahren zur Ermittlung der Dauerstandfestigkeit hat sich jedenfalls in den neu untersuchten Fällen wieder durchaus bewährt[12]).

Zusammenfassung

Dauerstandfestigkeitsuntersuchungen haben ergeben, daß eine geschweißte Kesselblechverbindung eine höhere Dauerstandfestigkeit besitzt als das Blechmaterial und das niedergeschmolzene Schweißmaterial. Diese höhere Dauerstandfestigkeit der Schweißverbindung

kommt dadurch zustande, daß in der Schweißverbindung innere Spannungen und Gefügeausbildungen auftreten, die die Formänderung behindern. Dies konnte gezeigt werden, indem man Schweißverbindungen glühte. Durch Entfernung der inneren Spannungen und Angleichung des Gefüges an das des Blechmaterials wurden die Dauerstandfestigkeiten der Verbindung der des Blechmaterials fast gleich.

Eine Wärmebehandlung nach Glühung I ($^1/_2$ Std. bei 930° C) hatte zur Folge, daß die Dauerstandfestigkeit des Vollblech-Vergleichsstabes (Flußstahl I) sich unwesentlich verringert, die des geschweißten Stabes erheblich absinkt und nahe, etwa 1 kg/mm² unter dem Vollblech-Vergleichsmaterial (Flußstahl I) liegt. Eine Glühung II ($^1/_2$ Std. bei 650° C) an geschweißten Stäben führte dazu, daß die Dauerstandfestigkeit dieser etwa 1 kg/mm² über dem Vollblech-Vergleichsmaterial zu liegen kommt. Die Wirkung der Glühung I wird hervorgerufen durch die gleichzeitig erfolgte Gefügeveränderung und die Beseitigung innerer Spannungen, die Wirkung der Glühung II durch die Beseitigung der inneren Spannungen.

Für den Konstrukteur, der die Schweißung verwenden will, ist die Gesamtheit der Feststellungen insofern wichtig, als in jedem Zustand die Schweißung — gute Ausführung vorausgesetzt — auch bei langdauernden statischen Belastungen im Bereich von 400° keine Stelle ist, die die Konstruktion gefährdet.

Das Knickpunktverfahren zur Ermittlung der Dauerstandfestigkeit hat sich bei der vorliegenden Untersuchung wieder durchaus bewährt.

Schrifttum

[1]) Krupp M. 1925, S. 181.

[1a]) Mitt. K. W. Inst. Eisenforsch. Bd. 9, Liefg. 22, Abhdlg. 95.

[1b]) Z. V. d. I. 1904, S. 1300 f; Mitt. Forsch. Arb. H 28.

[2]) Mitt. K. W. Inst. Eisenforsch. 9 (1927), S. 339/400.

[3]) H. Juretzek und F. Sauerwald, Zeitschrift für Physik, 83 (1933), S. 483.

[4]) Die Maschine wurde teils in der Werkstatt der Zuckerfabrik Puschkowa, teils bei der Firma Främbs & Freudenberg, Schweidnitz, hergestellt, wofür diesen beiden schlesischen Werken auch an dieser Stelle vielmals gedankt wird.

[5]) Mitteilungen aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung zu Düsseldorf, Bd. XII, 1930, Lieferung 10 Abhandlung 152, S. 127.

[6]) Näheres darüber: H. Rechenberg, Elektrotechnische Zeitschrift, 1931, Heft 49, S. 1498.

[7]) Für diese freundliche Unterstützung wird der Firma auf das verbindlichste gedankt.

[8]) F. Wörtmann und W. Mohr, Schweizer Bauzeitung, 100 (1932), S. 243/46.

[9]) F. Bollenrath, Aachen, Stahl und Eisen, 54 (1934), S. 630.

[10]) Mitt. K. W. I. Eisenforsch. Düsseldorf XVI, 1934, Lieferung 14, Abh. 261, S. 159.

[11]) Vgl. E. Siebel und M. Ulrich, Zeitschr. d. Ver. d. Ing., 76, 659, 1932.

[12]) Die Kennzeichnung früherer durch das Knickpunktverfahren ermittelter Versuchsergebnisse durch P. Grün (Mttlg. aus dem Forschungsinstitut der Ver. Stahlwerke Dortmund, 1934, Bd. 4, Lfrg. 4) ist insofern irreführend, als nur die Ergebnisse für die Stufenversuche und auch diese nur unvollkommen angeführt sind. Tatsächlich wurde damals bei völlig eindeutig auswertbaren Vergleichen zwischen Knickpunktverfahren und Langdauerversuchen zehnmal Übereinstimmung, einmal eine Abweichung aufgefunden. Im übrigen ist in der Arbeit von Grün bemerkenswert, daß dort ebenfalls eine schärfere Beurteilung des Materials vorgenommen wird als von Pomp und Enders, da bei 500° 5.10^{-4} % Dehnung in der 25. bis 35. St. verlangt werden. Inzwischen ist das Knickpunktverfahren auch mit Erfolg auf Al-Legierungen von Irmann und Müller angewendet worden (Aluminium 1935, S. 7).

Lebenslauf

Als Sohn des Kassenrendanten Emil Appaly und seiner Ehefrau Hedwig, geb. Seidel, bin ich am 15. Februar 1896 zu Breslau geboren. Meine Schulbildung genoß ich auf dem Matthias-Gymnasium zu Breslau und auf dem katholischen Gymnasium zu Glogau. Vom September 1914 bis Dezember 1918 stand ich im Heeresdienst. Während der ersten drei Kriegsjahre gehörte ich dem Feldartillerie-Regiment Nr. 41 an und wurde März 1917 zum Leutnant der Reserve befördert. Von Sommer 1917 bis zum Kriegsende war ich nach erfolgter Ausbildung als Flugzeugführer wieder an der Front tätig.

Mit dem Sommersemester 1919 begann ich an der Technischen Hochschule mein Studium in der Abteilung für Maschinen - Ingenieurwesen und Elektrotechnik, das ich im Mai 1922 mit der Diplom-Hauptprüfung beendete.

Von August 1922 bis Februar 1923 war ich bei der Maschinenfabrik und Mühlenbauanstalt G. Luther A. G. Braunschweig als Konstrukteur in der Abteilung Transportanlagen tätig. Ich verließ diese Stellung freiwillig, um mich im Betriebe weiterzubilden und trat die Stelle eines Betriebsingenieurs bei den Oppelner Portland-Zementfabriken vorm. F. W. Grundmann am 17. Februar 1923 an. Infolge Betriebseinschränkung, die mit der Aufhebung beider Ingenieurstellen verbunden war, verließ ich Oppeln am 15. Oktober 1923.

In Breslau nahm ich mein volkswirtschaftliches Studium, das ich in den beiden Jahren meiner praktischen Tätigkeit nur nebenbei betrieben hatte, voll auf und promovierte im Juli 1924 zum Dr. rer. pol.

Am 1. September 1924 übernahm ich die Leitung der Reparaturwerkstatt der Automobilfirma Hauck & v. Damnitz, Breslau.

Durch Freiwerden der Stelle eines Leiters der Technischen Nothilfe in Oberschlesien trat ich am 25. Februar 1925 zur Technischen Nothilfe über und bekleidete diesen Posten bis Juni 1928.

Seit dieser Zeit bin ich als Revisionsingenieur und Sachverständiger für Schweißverfahren beim Schlesischen Verein zur Überwachung von Dampfkesseln tätig.